

УДК 536.2.023;539.893

## ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ АБЛЯЦИЯ ТИТАНА ПРИ ФЕМТОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2019 г. Е. В. Струлёва<sup>1</sup>, \*, П. С. Комаров<sup>1</sup>, С. И. Ашитков<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

\*E-mail: struleva.evgenia@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.12.2018 г.

После доработки 26.12.2018 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Методом интерференционной микроскопии исследована абляция титановой мишени при однократном воздействии лазерных импульсов длительностью 40 фс. Измерены порог термомеханической абляции по поглощенной плотности энергии и зависимость глубины кратера от плотности энергии лазерного импульса. Результаты исследования морфологии и нанорельефа поверхности кратеров свидетельствуют об откольном характере разрушения поверхностного слоя в конденсированном состоянии.

DOI: 10.1134/S0040364419040215

### ВВЕДЕНИЕ

Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов (ФЛИ) с интенсивностью  $10^{12}$ – $10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup> на металлы приводит к изохорическому нагреву электронов проводимости в тонком приповерхностном слое толщиной 10–20 нм. Передача энергии в решетку осуществляется посредством электрон-фононного теплообмена, быстрое плавление которой происходит за времена порядка единиц или десятков пикосекунд. Под действием возникающих в веществе мощных растягивающих напряжений часть расплава удаляется в виде тонкого откольного слоя (термомеханическая абляция) [1–8]. При этом на поверхности металла остается кратер. Характер разрушения вещества связан с развитием кавитационного процесса образования и роста зародышей паровой фазы в расплаве в волне разряджения, абляцией нанослоя, последующей рекристаллизацией и формированием на поверхности нанорельефа в виде ячеистых разветвленных структур [9–11].

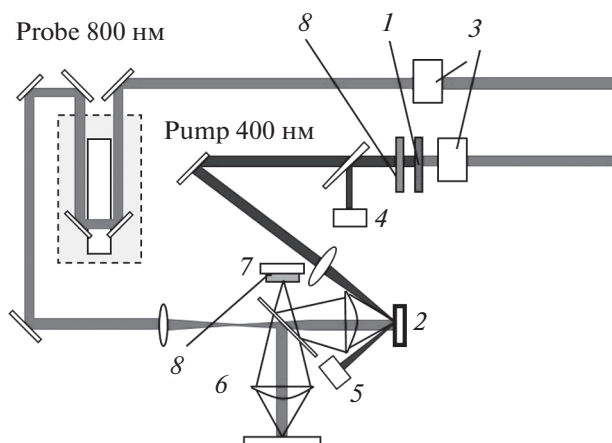
Абляция исследовалась ранее для ограниченного числа металлов [12–17]. Однако систематических исследований, позволяющих получить подробную информацию о быстропротекающих процессах, необходимую для совершенствования теоретических моделей металлов в двухтемпературном состоянии, до настоящего времени не проводилось.

В данной работе представлены новые экспериментальные данные о фемтосекундной абляции титана, в том числе о значении порога разрушения, особенностях морфологии и нанорельефа поверхности кратеров. Полученные результаты

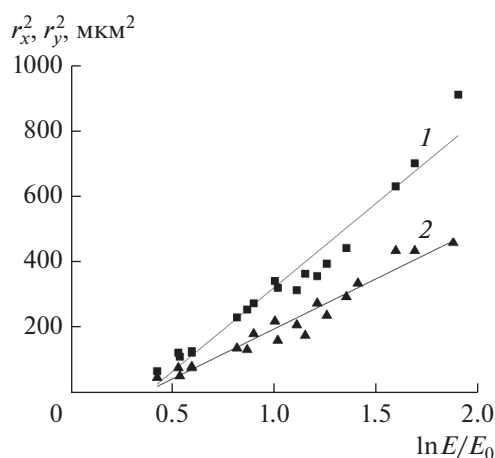
представляют фундаментальный интерес для физики неравновесных процессов в металлах, а также могут быть использованы для развития методов лазерных технологий прецизионной обработки и наноструктурирования материалов, в частности титана, широко применяемого в различных отраслях промышленности и в медицине.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

В эксперименте применялась *pump-probe*-схема интерференционной микроскопии, позволяющая регистрировать пространственное распределение изменения фазы отраженной волны от мишени, что дает информацию о нанорельефе поверхности. Источником ФЛИ являлась титан-сапфировая лазерная система, генерирующая фемтосекундные импульсы с энергией до 2 мДж на длине волны 800 нм. В оптической схеме *p*-поляризованный лазерный импульс длительностью 40 фс после преобразования в кристалле LBO 1 на длине волны излучения  $\lambda_1 = 400$  нм падал на поверхность мишени 2 под углом 60° (рис. 1). Луч фокусировался линзой с фокусным расстоянием  $f = 20$  см. Пространственное распределение плотности энергии в фокальном пятне соответствовало гауссову с радиусом 14 мкм по уровню  $e^{-1}$ . Для изменения плотности энергии нагревающего и зондирующего импульсов в схеме применялись аттенюаторы 3, состоящие из полуволновой пластины и призмы Глана. Энергия в каждом импульсе измерялась калиброванным фотодиодом 4. В эксперименте предусматривалось измерение коэффициента отражения мишени 2. Для этого при каждом воздействии энергия, отраженная от



**Рис. 1.** Экспериментальная схема: 1 – кристалл LBO, 2 – мишень, 3 – аттенюаторы, 4 – фотодиод, 5 – калориметр, 6 – интерферометр Майкельсона, 7 – ПЗС-камера, 8 – светофильтры.



**Рис. 2.** Определение порога абляции титана ( $E_0 = 1$  мкДж).

поверхности образца, регистрировалась с помощью измерителя энергии Sigma (Coherent) 5.

Измерительная схема представляла собой интерферометр Майкельсона с переносом изображения поверхности образца в плоскость ПЗС-матрицы 7. Зондирующий импульс на длине волны  $\lambda_2 = 800$  нм направлялся в интерферометр. Для переноса изображения поверхности мишени в плоскость ПЗС-матрицы 7 использовался микрообъектив Olympus с числовой апертурой  $NA = 0.2$ . Пространственное разрешение в плоскости мишени составляло  $\sim 3\text{--}4$  мкм. Светофильтры 8 применялись в схеме для фильтрации излучения.

В качестве мишени 2 использовалась пленка титана толщиной 700 нм, нанесенная методом магнетронного напыления на стеклянную подложку. С помощью двухкоординатного микро-

транслятора после каждого воздействия нагревающего импульса мишень сдвигалась на новое место. В экспериментах для последующего определения глубины кратеров записывались две интерферограммы: начальная и конечная, содержащие информацию о рельефе поверхности до и после воздействия лазерного импульса.

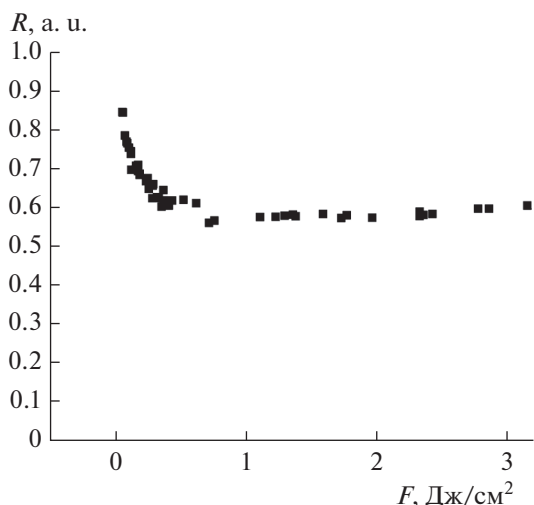
Высокая точность измерения фазы отраженной волны зондирующего излучения  $\delta\phi \approx \pi/200$  достигалась путем применения алгоритма двумерного фурье-анализа интерферограмм, а также процедуры нормировки изображений и соответствовала погрешности определения смещения поверхности образца на уровне  $\delta z \approx 1\text{--}2$  нм. Смещение поверхности  $\Delta z$  связано с изменением фазы  $\Delta\phi$  соотношением  $\Delta z = \Delta\phi \lambda_2 / 4\pi$ , где  $\lambda_2$  – длина волны зондирующего импульса. Более подробно методика обработки интерферограмм описана в работе [18]. Интерферометрическим методом с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) проведены исследования морфологии и нанорельефа кратеров с различным пространственным разрешением.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

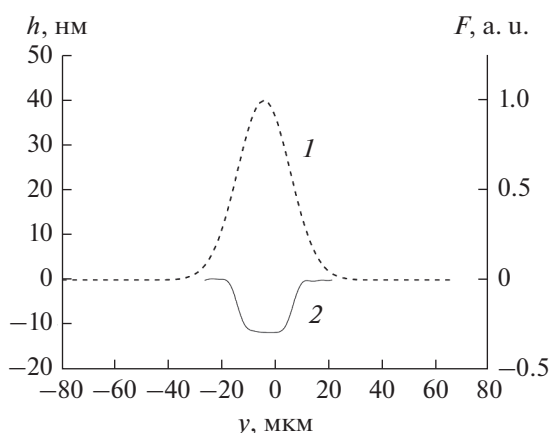
Значение порога абляции титана получено с помощью методики измерения порогов для лазерных импульсов с гауссовым распределением интенсивности по сечению пучка [19]. На рис. 2 приведены результаты измерения порога образования кратера на Ti. На графике отображены зависимости квадратов радиусов эллиптического кратера вдоль большой  $r_x^2$  (1) и малой  $r_y^2$  (2) осей от логарифма падающей энергии лазерного импульса  $E$ . Точка пересечения прямых, аппроксимирующих экспериментальные значения (маркеры), с осью абсцисс соответствует значению пороговой энергии ФЛИ. Углы наклона аппроксимирующих прямых определяют пространственный параметр гауссова распределения  $r_{0x} = 21$  мкм и  $r_{0y} = 14$  мкм по уровню  $e^{-1}$ . Полученное значение порога абляции титана по падающей энергии составило  $F_{abl} = 0.16$  Дж/см<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента отражения образца плотности энергии  $F$  нагревающего импульса. Полученные экспериментальные результаты при низкой интенсивности ФЛИ хорошо согласуются с литературными данными для Ti [20]. Значение коэффициента отражения титановой мишени вблизи порога абляции  $R \approx 0.7$ . Значение порога абляции титановой мишени по поглощенной энергии составило  $F_{abs} = 48$  мДж/см<sup>2</sup>.

На рис. 4 показан характерный профиль кратера вблизи порога абляции, полученный после об-



**Рис. 3.** График зависимости коэффициента отражения титанового образца  $R$  от плотности энергии  $F$  нагревающего импульса.

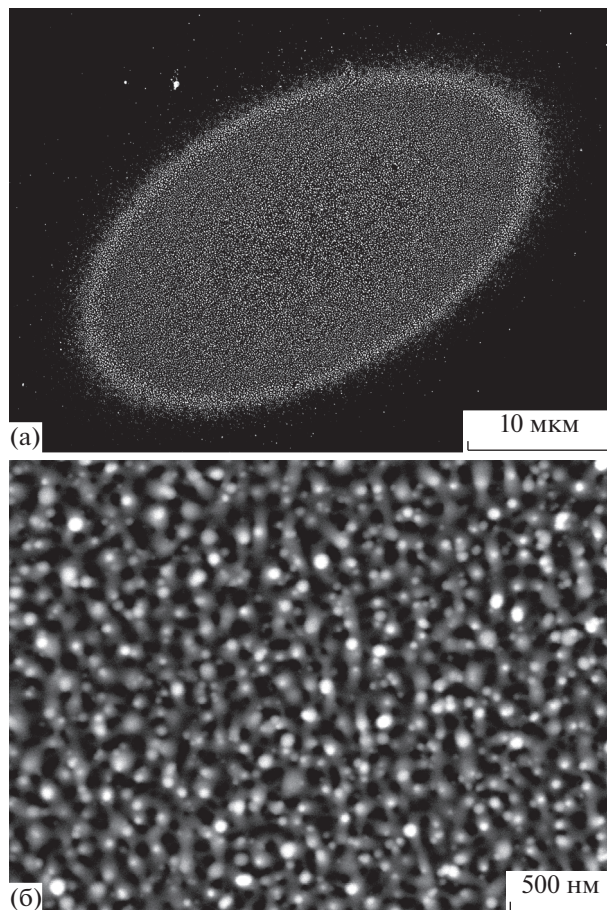


**Рис. 4.** Профили лазерного импульса (1) и кратера абляции (2) на поверхности титана после воздействия ФЛИ при  $F_0 = 2F_{abl}$ .

работки интерферограмм при  $F_0 = 2F_{abl}$ . Абляционный кратер имеет резкие вертикальные границы и плоское дно, по форме заметно отличаясь от гауссова распределения излучения в фокальном пятне. Таким образом, морфология кратера на поверхности исследуемого образца свидетельствует об откольном характере разрушения в расплаве титана после воздействия ФЛИ. Глубина кратера на титане вблизи порога  $F_{abl}$  составляет  $h \approx 12$  нм.

Откольный характер удаления вещества с поверхности титановой мишени при фемтосекундном воздействии и наличие кавитации в расплаве также подтверждают результаты исследования образцов с помощью СЭМ. На рис. 5 приведены изображения поверхности титановой мишени после однократного воздействия ФЛИ.

Дно кратера на рис. 5б покрыто характерными для термомеханической абляции металла ячеи-



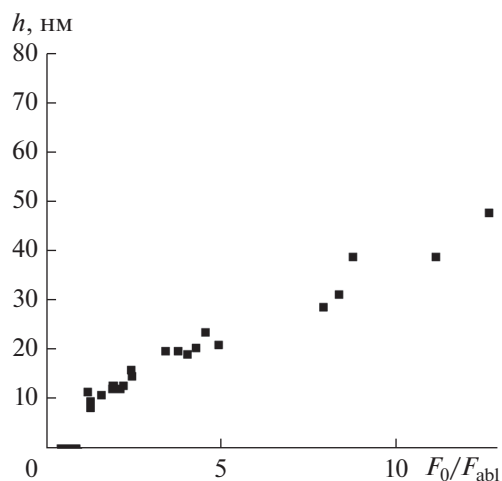
**Рис. 5.** СЭМ-изображения поверхности титановой мишени после однократного воздействия ФЛИ, полученные с помощью СЭМ: (а) – кратер, (б) – фрагмент дна.

стыми разветвленными структурами с наноразмерными сферами [9], свидетельствующими о разрыве кавитационных пузырьков, которые образуются в результате вспенивания метастабильного расплава под действием растягивающих напряжений, и при последующем затвердевании. Размер сферических наночастиц составляет 50–100 нм в диаметре.

На рис. 6 приведены зависимости глубины кратера от плотности энергии ФЛИ. Каждая точка получена путем измерения глубины  $h$  в центре кратера после воздействия импульса с различной энергией. На графике наблюдается монотонный рост глубины кратера от плотности падающей энергии. Глубина кратера меняется от 9 до 48 нм при  $1 < F_0/F_{abl} < 13$ .

Для грубой оценки температуры расплава вблизи порога абляции воспользуемся соотношением

$$\frac{(1 - R)F}{d_T} = c_f \rho \Delta T + H_m,$$



**Рис. 6.** Зависимость глубины в центре кратера  $h$  от превышения плотности энергии нагревающего импульса над пороговым значением  $F_0/F_{abl}$  для мишени из титана.

где  $\Delta T = T - T_0$  – приращение температуры ( $T_0 = 300$  К – начальная температура).

Полагая, что толщина прогреваемого слоя  $d_T$  вдвое превышает глубину кратера  $h \approx 10$  нм (т.е. разрыв происходит на половине толщины расплава), и принимая значение коэффициента отражения  $R \approx 0.7$ , теплоемкости  $c_i = 989.2$  Дж/(кг К) (для 2000 К), плотности  $\rho = 4.5$  г/см<sup>3</sup>, удельной теплоты плавления титана  $H_m = 15.5$  кДж/моль [21, 22], можно оценить температуру расплава при плотности энергии нагревающего импульса при  $F = 1.2F_{abl} = 0.192$  Дж/см<sup>2</sup>, составляющую  $T \approx 7$  кК. Это примерно в 3.5 раза превышает температуру плавления титана в равновесных условиях  $T_{melt} = 1941$  К [22].

В титане из-за его малой теплопроводности (по сравнению с Al, Au) откольный слой получается более тонким. Причем из-за большой энергии когезии требуется значительное количество поглощенной энергии для отрыва слоя. Вследствие этого плотность энергии на единицу объема, а следовательно, и температура на пороге термомеханической абляции велики.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом оптической интерференционной микроскопии проведено исследование абляции титана при фемтосекундном лазерном воздействии. Результаты измерения порога абляции, морфологии и нанорельефа поверхности кратеров указывают на откольный характер разрушения вещества в конденсированном состоянии, обусловленный кавитационным процессом образования и роста зародышей паровой фазы при

растяжении расплава. Измеренный порог откольной абляции титана по поглощенной плотности энергии при однократном воздействии ФЛИ составил  $F_{abs} = 48$  мДж/см<sup>2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-38-00662).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301.
2. Sokolowski-Tinten K., Bialkowski J., Cavalleri A., Von der Linde D., Oparin A., Meyer-ter-Vehn J., Anisimov S.I. Transient States of Matter During Short Pulse Laser Ablation // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 224.
3. Ivanov D.S., Zhigilei L.V. Combined Atomistic-Continuum Modeling of Short-Pulse Laser Melting and Disintegration of Metal Films // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 064114.
4. Bulgakova N.M., Stoian R., Rosenfeld A., Hertel I.V., Campbell E.B. Electronic Transport and Consequences for Material Removal in Ultrafast Pulsed Laser Ablation of Materials // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. P. 054102.
5. Agranat M.B., Anisimov S.I., Ashitkov S.I., Zhakhovskii V.V., Inogamov N.A., Nishihara K., Petrov Yu.V., Khokhlov V.A., Fortov V.E. Dynamics of Plume and Crater Formation after Action of Femtosecond Laser Pulse // Appl. Surf. Sci. 2007. V. 253. Iss. 15. P. 6276.
6. Povarnitsyn M.E., Itina T.E., Sentis M., Khishchenko K.V., Levashov P.R. Material Decomposition Mechanisms in Femtosecond Laser Interactions with Metals // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. № 23. P. 235414.
7. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Ашитков С.И., Петров Ю.В., Агранат М.Б., Анисимов С.И., Нишихара К., Фортвов В.Е. О нанотокле после воздействия ультракороткого лазерного импульса // ЖЭТФ. 2008. Т. 134. Вып. 1. С. 5.
8. Zhao X., Shin Y.C. Femtosecond Laser Ablation of Aluminum in Vacuum and Air at High Laser Intensity // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 283. P. 94.
9. Ашитков С.И., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Эмиров Ю.Н., Агранат М.Б., Олейник И.И., Анисимов С.И., Фортвов В.Е. Образование нанополостей в поверхностном слое алюминиевой мишени при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. Вып. 4. С. 192.
10. Vorobyev A.Y., Guo C. Enhanced Absorptance of Gold Following Multipulse Femtosecond Laser Ablation // Phys. Rev. B. 2005. V. 72. P. 195422.
11. Romashevskiy S.A., Agranat M.B., Dmitriev A.S. Thermal Training of Functional Surfaces Fabricated with Femtosecond Laser Pulses // High Temp. 2016. V. 54. № 3. P. 461.
12. Ashitkov S.I., Komarov P.S., Struleva E.V., Inogamov N.A., Agranat M.B., Kanel G.I., Khishchenko K.V. The Behavior of Tantalum under Ultrashort Loads Induced by Femtosecond Laser // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 653. P. 012001.
13. Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлева Е.В., Агранат М.Б. Прочность жидкого олова в условиях предельно высоких скоростей де-

- формации при фемтосекундном лазерном воздействии // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. Вып. 8. С. 611.
14. *Ашитков С.И., Комаров П.С., Овчинников А.В., Струлева Е.В., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Агранат М.Б.* Абляция металлов и образование наноструктур под действием фемтосекундных лазерных импульсов // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 6. С. 535.
  15. *Ashitkov S.I., Komarov P.S., Struleva E.V., Inogamov N.A., Agranat M.B.* Laser Ablation of Tantalum, Two-Temperature Physics and Strength of Melt // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. P. 012002.
  16. *Struleva E.V., Komarov P.S., Ashitkov S.I.* Characteristics of Tantalum Ablation under the Impact of a Femtosecond Laser // High Temp. 2018. V. 56. № 5. P. 648.
  17. *Артюков И.А., Заярный Д.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Макаров С.В., Салтуганов П.Н.* Релаксационные процессы электронной и решеточной подсистем при абляции поверхности железа ультракороткими лазерными импульсами // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. Вып. 1. С. 54.
  18. *Temnov V.V., Sokolowski-Tinten K., Zhou P., Von der Linde D.* Ultrafast Imaging Interferometry at Femtosecond-Laser-Excited Surfaces // J. Opt. Soc. Am. B. 2006. V. 23. № 9. P. 1954.
  19. *Liu J.M.* Simple Technique for Measurements of Pulsed Gaussian-Beam Spot Sizes // Opt. Lett. 1982. V. 7. № 5. P. 196.
  20. *Werner W.S.M., Glantschnig K., Ambrosch-Drax C.I.* Optical Constants and Inelastic Electron-Scattering Data for 17 Elemental Metals // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2009. V. 38. № 4. P. 1013.
  21. *Зиновьев В.Е.* Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Спр. изд. М.: Металлургия, 1989. 219 с.
  22. *Кикоин И.К.* Таблица физических величин. Спр. М.: Атомиздат, 1976. 177 с.